

Juho Leskinen

## **Pneumatiikan opintomateriaalin tutkimus**

Opinnäytetyö

Kevät 2011

Tekniikan yksikkö

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

Auto- ja työkonetekniikan suuntautumisvaihtoehto



## SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

### Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Juho Leskinen

Työn nimi: Pneumatiikan opintomateriaalin tutkimus

Ohjaaja: Matti Tervonen

Vuosi: 2011

Sivumäärä: 38

Liitteiden lukumäärä: 3

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin tutkimalla nykyistä pneumatiikan opintomateriaalia eri ammattikorkeakouluissa ja ammattioppilaitoksissa. Tutkimuksella kartoitettiin pneumatiikan eri aihealueiden laajuutta ja tasoa opetuksessa. Samalla tutkittiin verkkopohjaisen materiaalin soveltuvuutta uudeksi opintomateriaaliksi. Tutkimuksen pääasiallinen tavoite oli määrittää uuden opintomateriaalin tarve myytäväksi oppilaitoksille.

Tutkimuksessa haastateltiin eri oppilaitosten pneumatiikan opettajia sähköisillä haastattelukaavakkeilla ja tutkittiin myös oppilaitosten käyttämiä nykyisiä pneumatiikan opintomateriaaleja. Niiden vastaavuutta selvitettiin haastatteluista saatuihin tietoihin ja tuloksiin.

Tutkimuksen tulosten perusteella ilmenee tarvetta uudelle pneumatiikan opintomateriaalille. Kuvamateriaali, interaktiivisuus ja havainnollisuus sekä käytännön järjestelmien kytkentäharjoitukset kaipaavat parannusta. Nykyisten 2D-kuvien ja piirrosmerkkien sijasta uudessa materiaalissa käytettäisiin enemmän 3D-mallinnusta ja animaatioita havainnollisuuden lisäämiseksi. Esille nousi tarve myös testipenkil-  
le, jossa käytännön harjoituksia voisi suorittaa.

Avainsanat: pneumatiikka, paineilma, tutkimus, oppimateriaali, kolmiulotteisuus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Automotive and Transportation Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Juho Leskinen

Title of thesis: Research on the study material of pneumatics

Supervisor: Matti Tervonen

Year: 2011

Number of pages: 38

Number of appendices: 3

---

My thesis deals with the research on the study material of pneumatics at different schools. The research was conducted in order to have a clear view of the quality of present education of the pneumatics. Another part of the research was to find out if there is a need for a new study material and if the web based material could be applicable for this purpose.

The research was done by interviewing teachers in different schools by the web based questionnaires and by researching the study programs concerning the pneumatics. The results of the research on the study programs were analysed with the results of the interviews.

The overall results indicate that there is a need for a new study material, especially for 3D-pictures and animations which would improve the illustration concerning the components and their operation. There is also a need for a platform where the different tests and measurements could be made.

Keywords: pneumatics, compressed air, research, study material

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ .....	4
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	5
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
1 JOHDANTO .....	7
2 OPPIMISKÄSITYKSET .....	8
3 PNEUMATIIKKA JA SEN OPETUS .....	9
3.1 Perusteet.....	9
3.2 Teoria ja laskenta.....	11
3.3 Komponentit ja toimilaitteet .....	18
3.4 Alipainetekniikka .....	27
3.5 Järjestelmäsuunnittelu .....	29
4 UUSI OPINTOMATERIAALI.....	33
5 YHTEENVETO.....	34
LÄHTEET .....	37
LIITTEET .....	38

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Ideaalikaasu</b>	Kuviteltu mallikaasu, jonka avulla voidaan matemaattisesti kuvata kaasun käyttäytymistä eri olosuhteissa.
<b>Polytrooppivakio</b>	Kokeellisesti määritettävä, polytrooppista prosessia kuvaava vakio.
<b>Adiabaattivakio</b>	Ominaislämpöjen vakiosuhteen nimitys.
<b>Reynoldsin luku</b>	Dimensioton luku, jolla kuvataan virtauksen laminaarisuutta tai turbulenttisuutta.
<b>Venturi-ilmiö</b>	Ilmiö, jossa fluidin virtausnopeus ja staattinen paine muuttuvat suhteessa kulkureitin poikkipinta-alan muutokseen.
<b>Ominaistilavuus</b>	Kuvaa aineen tilavuuden ja massan välistä suhdetta. Yksikkö $\text{m}^3/\text{kg}$ .

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

KUVIO 1. Paineilmajärjestelmän alkupää .....	10
KUVIO 2. Virtausnopeusprofiilit (M-Tec 2009.) .....	15
KUVIO 3. Venturi-ilmiö.....	16
KUVIO 4. Tyypillinen paineilmajärjestelmä (MTI 2009.) .....	19
KUVIO 5. Putkiston suositeltava rakenne .....	21
KUVIO 6. Pneumatiikkaventtiilejä (Mediakolmio.) .....	22
KUVIO 7. Sylinterin ohjaus vaihtovastaventtiileillä (Hulkkonen 2008.).....	23
KUVIO 8. Symmetrinen sylinteri.....	25
KUVIO 9. Yksiasteinen ejektori .....	28
KUVIO 10. Kaksitoimisen sylinterin piirrosmerkki .....	30
TAULUKKO 1. Nykyisen materiaalin pääkohdat .....	34
TAULUKKO 2. Materiaalin kehittämisen pääkohdat .....	35

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty HVM-Systems Oy:n toimeksiantona. HVM-Systems Oy on autoalan koulutuspalveluja ja diagnostiikkatyökaluja tarjoava yritys, jonka ylläpitämät verkkopohjaiset kurssit ovat ProDiags-oppimisympäristössä. ProDiags sisältää maksullisia, interaktiivisia tekniikan alan kursseja ammattioppilaitoksille, ammattikorkeakouluille ja aikuisopiskelijoille. Myös ajoneuvomekaanikkojen täydennyskoulutusta tuetaan ProDiagsin avulla.

Tässä työssä tutkittiin nykyistä pneumatiikan opintomateriaalia eri ammattikorkeakouluissa ja ammattioppilaitoksissa. Tutkimuksella kartoitettiin pneumatiikan eri osa-alueiden laajuutta ja tasoa opetuksessa. Samalla tutkittiin verkkopohjaisen materiaalin soveltuvuutta uudeksi opintomateriaaliksi. Tutkimuksessa päästiin lopulliseen tavoitteeseen eli määrittämään uuden opintomateriaalin tarve myytäväksi oppilaitoksille (ks. Luku 4). Tutkimuksen ohessa kehitetty haastattelukaavakkeiden tarkka rakenne ja kysymykset on jätetty pois luottamussyistä.

Tutkimuksessa haastateltiin eri oppilaitosten pneumatiikan opettajia sähköisillä haastattelukaavakkeilla. Haastatteluissa käytettiin kuutta eri kaavaketta ProDiags-ohjelmassa. Samalla haastateltavat saivat tutustua yhteen jo olemassa olevaan verkkopohjaiseen kurssiin ja antaa mielipiteensä sen soveltuvuudesta mahdollisen uuden opintomateriaalin pohjaksi.

Tutkimuksessa käytettiin myös oppilaitosten käyttämiä nykyisiä pneumatiikan opintomateriaaleja. Niiden vastaavuutta selvitettiin haastatteluista saatuihin tietoihin ja tuloksiin. Myös muita pneumatiikan materiaaleja, kuten kirjastoista saatavilla olevia teoksia, verkkomateriaaleja ja Theseus-ohjelmasta löytyviä valmiita ammattikorkeakoulujen opinnäytetöitä tutkittiin. Kaikki materiaali analysoitiin ja otettiin huomioon myös tekijänoikeuksiin liittyvät seikat, joista myös haastattelukaavakkeissa opettajilta kysyttiin.

## 2 OPPIMISKÄSITYKSET

Koska haastatteluun osallistui pneumatiikan opettajia ja paljon materiaalia tutkittiin suoraan oppilaitosten käyttämistä opintomateriaaleista, haastattelun vastauksista heijastui erilaisia käytössä olevia opetusmenetelmiä sekä oppimistapoja. Oppimiskäsitykset ovatkin muuttuneet ajan kuluessa. Nykyistä, konstruktivistista oppimiskäsitystä ennen, vallitsi kognitiivinen ja kokemuksellinen näkemys oppimiseen. (Salminen ym. 2008.)

Kokemuksellisen oppimiskäsityksen mukaan oppiminen liittyy kokemusten laajenemiseen ja muuttumiseen. Oppimista pidetään syklinä, joka koostuu kokemuksesta ja sen reflektoinnista, käsitteellistämisestä ja kokeilevasta toiminnasta. Reflektointi tarkoittaa oppimisen ja kokemusten analysointia. Keskeisenä tässä oppimiskäsityksessä pidetään sosiaalista ja persoonallista kasvua ja itsetuntemuksen lisääntymistä. Kognitiivisen käsityksen mukaan tärkeintä on yksilön oppiminen, joka tapahtuu psykologisena prosessina. (Salminen ym. 2008.)

Nykyisen, konstruktivistisen oppimiskäsityksen mukaan, oppiminen on tulosta omasta toiminnasta. Oppija tulkitsee uutta tietoa aikaisemman kokemuksensa ja tietonsa pohjalta sekä rakentaa uutta tietoa vanhan päälle. Tärkeää on opetettavan asian merkityksen rakentaminen, mikä edellyttää sen ymmärtämistä. Oppimisen tulisi olla aina sidoksissa kontekstiin ja sosiaalisesti vuorovaikutuksellista. (Salminen ym. 2008.)



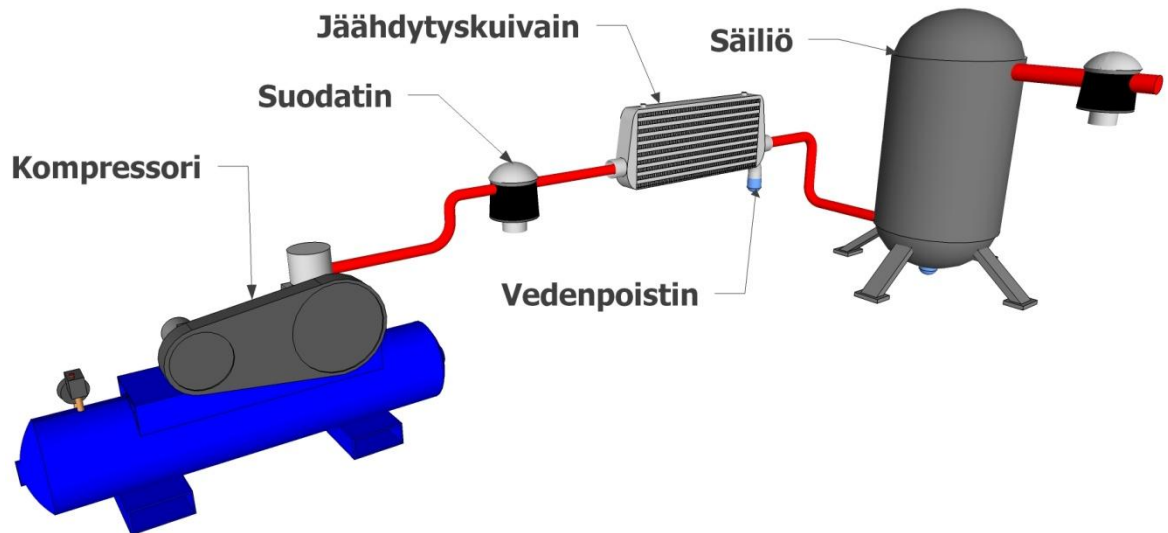
### 3 PNEUMATIikka JA SEN OPETUS

#### 3.1 Perusteet

Pneumatiikka tarkoittaa paineistetun kaasun käyttämistä tehonsiirrossa. Tässä työssä keskitytään pelkästään ilmaa hyödyntäviin sovelluksiin. Paineilmalla käytetään usein jotain työkalua tai toimilaitetta, mutta myös sen paineistettua olomuotoa tai virtausnopeuden muutosta käytetään hyväksi esimerkiksi nuohouksessa, alipainetekniikassa ja räjähdysherkissä ympäristöissä. Paineilmaa tuotetaan, hallitaan ja käsitellään erilaisilla järjestelmäkohtaisilla komponenteilla käyttökohteesta riippuen. Ilma on luonnossa esiintyvä, ihmiselle vaaraton kaasu ja siksi pneumatiikkaa pidetäänkin ihmiselle vaarattomimpana energiamuotona. (Keinänen ym. 2005.)

Pneumatiikan käyttö on yleistä konepajateollisuudessa, ajoneuvotekniikassa, roboteissa sekä muissa sovelluksissa joissa käsiteltävät kappaleet ovat kevyitä eivätkä vaadi tarkkaa liikerataa. Paineilma soveltuukin parhaiten toimilaiteliikkeisiin, joissa liikerata tapahtuu äärilaidasta toiseen. Paineilman etuihin voidaan lukea myös sen mahdollistama nopeiden liikkeiden käyttö toimilaitteissa. Haittapuolena on kosteuden kerääntyminen järjestelmään ja sen aiheuttama korroosio. (Keinänen ym. 2005; Kärkkäinen ym. 1997.)

Paineilmajärjestelmät (KUVIO 1.) ovat yleisiä teollisuudessa ja niiden avulla voidaan siirtää paineilmaa pitkiäkin matkoja eri komponenteille ja toimilaitteille. Paineilman käyttö roboteissa on suosittua pehmeän tarttumisen vuoksi, mikä ehkäisee tartuttavan kappaleen rikkoontumista. (Keinänen ym. 2005; Douglas ym. 2005.)



KUVIO 1. Paineilmajärjestelmän alkupää.

Ajoneuvotekniikassa paineilmaa käytetään esimerkiksi raskaan kaluston jarruissa, teliakseleiden nostosylintereissä ja robottivaihteistojen vaihteen kytkennässä. Ilman kokoonpuristuvuuden avulla voidaan toteuttaa jousentapainen toiminta, jossa kalvo erottaa ilmasäiliön ja kalvoon kohdistuvan voiman. Kalvoon kohdistuva voima voi olla esimerkiksi ajoneuvon aktiivijousituksen komponentti, joka liikkuu tien epätasaisuuksien vuoksi. Myös polttomoottorin ahtamista voidaan pitää yhtenä pneumatiikan sovelluksena. Ahtamisen ideana on kasvattaa moottorin sylinterin täytösastetta pumppaamalla sinne paineilmaa yleensä joko pakokaasuahtimella (turboahdin) tai mekaanisella, moottorin kampiakselilta käyttövoimansa saavalta ahtimella. Sylinterin täytösasteen kasvaessa moottorista on saatavissa enemmän tehoa lisääntyneen hapen ansiosta. Toki myös riittävä polttoaineen saanti on varmistettava, jotta polttoaineen ja ilman seos pysyisi stoikiometrisenä ja täten seoksen palaminen mahdollisimman täydellisenä. (Bell 1997; Uicker ym. 2003.)

Pneumatiikkaa opetetaan oppilaitoksissa usein yhdessä hydrauliiikan kanssa. Niiden komponenteilla ja järjestelmillä onkin vain vähän eroavaisuuksia. Hydrauliiikassa käytetään nestettä ja pneumatiikassa kaasua, joiden yhteisnimitys on fluidi. Fluidilla tarkoitetaan tarkemmin väliainetta, jossa molekyylit voivat liikkua vapaasti suhteessa toisiinsa. Myös plasma kuuluu fluideihin (Douglas ym. 2005).

Pneumatiikan opetus tapahtuu ammattioppilaitoksissa yleensä ensimmäisenä lukuvuonna ja ammattikorkeakouluissa toisena lukuvuonna. Nykyisenä opintomateriaalina käytetään usein opettajan omaa materiaalia alan kirjallisuuden tukena. Myös sähköistä materiaalia käytetään yhä enemmän, esimerkiksi verkkopohjaista Moodle-oppimisympäristöä ja opettajan omaa sähköistä materiaalia. Käytetyin oppikirja opetuksessa on Ellmanin, Järvisen, Hautasen ja Simpuran kirjoittama Pneumatiikka.

Suurimmat erot ammattioppilaitosten ja ammattikorkeakoulujen opetuksessa ovat käytännön ja teorian keskinäisessä painotuksessa. Ammattioppilaitoksissa käytäntöä painotetaan enemmän eikä edes välttämättä mennä teoriaan kovinkaan syvästi. Sellainen opetus palveleekin paremmin ammattioppilaitoksen opiskelijoita, jos ajatellaan siellä opiskelevien todennäköisiä työllistymismahdollisuuksia ja työtehtäviä. Työtehtävät painottuvat todennäköisesti huoltoon, myyntiin ja järjestelmien kokoamiseen, kun taas ammattikorkeakoulusta valmistuneiden työtehtävät ovat enemmän suunnittelu- ja tuotekehityspainotteisia. Ammattikorkeakouluissa pneumatiikan teorialla ja laskennalla onkin suurempi merkitys tulevien työtehtävien kannalta.

### **3.2 Teoria ja laskenta**

Pneumatiikan teoria sisältää eri virtausmekaniikan osa-alueita, kuten virtauslajit, paineen, viskositeetin, ilman kosteuden, tiheyden ja molekyyliarakenteen. Usein keskitytään paineeseen ja virtaukseen putkistoissa, toimilaitteissa ja venttiileissä. Ilman kosteuden kondensoitumista vedeksi ja veden poistamista järjestelmästä käydään teoriaosuudessa myös, koska järjestelmän pysyminen vapaana vedestä on tärkeää. Virtausmekaniikka tässä tutkimuksessa tarkoittaa ilman tarkastelua statiikan ja dynamiikan näkökulmasta ja kaikkien teoreettisten aiheiden läpikäynti ei vastaa tämän työn tarkoitusta. Siksi käydäänkin läpi vain teoriaosuuksien pääkohdat. Laskentayhtälöt auttavat ymmärtämään ja konkretisoimaan teoreettisia asioita antamalla jonkin tuloksen, jota voidaan soveltaa käytännön pneumatiikan sovelluksiin. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Pneumatiikan teoreettinen tarkastelu on vaikeampaa kuin esimerkiksi kokoonpuristumattomien nesteiden. Ilman kokoonpuristuvuus riippuu lämpötilasta ja sillä on myös vaikutusta ilman ottamaan tilavuuteen. Usein hankalat teoreettiset tarkastelut korvataan likimääräistämällä ja käyttämällä apuna diagrammeja ja nomogrammeja. Useimmiten käytetään kostean ilman Mollier-käyriä, Moodyn diagrammia ja putkinomogrammia. Mollier-käyristä (ks. Liite 1.) voidaan lukea ilman sisältämä vesihöyry ja kastepisteet eri lämpötiloissa. Moodyn diagrammista (ks. Liite 2.) nähdään kitkakertoimen, putken suhteellisen pinnankarheuden ja Reynoldsin luvun väliset tekijät ilman virtauksen kannalta. Putkinomogrammia (ks. Liite 3.) käytetään putkiston mitoituksen apuna järjestelmän työpaineen ja ilmamäärän tarpeen perusteella. Pneumatiikan keskeisinä suureina ovat tarkasteltavassa tilavuudessa olevan ilman lämpötila ( $T$ ), paine ( $p$ ) ja tilavuus ( $V$ ). (Kärkkäinen ym. 2000; Douglas ym. 2005.)

Pneumatiikassa puhutaan systeemistä, joka tarkoittaa tiettyä määrää ainetta tai tilavuutta jonka käyttäytymistä halutaan tarkastella. Systeemejä on kahdenlaisia, avoimia ja suljettuja. Esimerkki suljetusta systeemistä on suljetussa toimilaitteessa oleva kaasu. Avoin systeemi on esimerkiksi pumppu. Systeemillä voi olla erilaisia tiloja ja siirtyminen tilasta toiseen voi tapahtua monella tavalla. Peräkkäisiä tilanmuutoksia kutsutaan prosessiksi. Erilaisia prosesseja ovat isobaarinen, isotermiinen, isokoorinen ja adiabaattinen. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Isobaarisessa prosessissa paine pysyy vakiona kun taas isotermisessä lämpötila pysyy muuttumattomana. Isokoorisessa prosessissa tilavuus ei muutu ja adiabaattisessa prosessissa ei tapahdu lämmönvaihtoa ympäristön kanssa. Sellaista tilanmuutosta, jossa systeemin rajapinnan läpi siirtyy lämpöä, kutsutaan polytrooppiseksi muutokseksi. Polytrooppiseen muutokseen liittyy myös kokeellisesti määritettävä polytrooppivakio ( $\gamma$ ).

Pneumatiikassa lämmöllä on suuri merkitys ja siksi termodynamiikan käsitteet ovatkin usein tarpeen paineilmajärjestelmän tilaa määritettäessä. Entropia ja entalpia ovat yleisiä termodynamiikan käsitteitä joihin pneumatiikassa törmää. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Entropia tarkoittaa epäjärjestyksen määrää systeemissä. Entropiaan liittyvä epäjärjestys yleensä on energian jakautumista tasaisesti tietyssä tilavuudessa sekä todennäköisyyksien ja epäjärjestyksen kasvamista. Yksi termodynamiikan keskeisistä käsitteistä on, että eristetyssä systeemissä entropia ei voi koskaan vähentyä mutta se voi kasvaa. Järjestyksen lisääminen eli entropian vähentäminen vaatii ulkoista työtä. Entalpia ilmaisee energiaa ja sen muutos isobaarisessa prosessissa on yleensä yhtä suuri kuin lämpöenergian siirtyminen. Entalpia koostuu systeemin sisäenergian sekä paineen ja tilavuuden tulon summasta. (Douglas ym. 2005.)

Yksi pneumatiikan peruskäsitteistä on ideaalikaasu, kuviteltu mallikaasu, jonka avulla voidaan matemaattisesti kuvata kaasun käyttäytymistä eri olosuhteissa. Ilma vastaa ideaalikaasua kuvaavia yhtälöitä kohtalaisen tarkasti alle 20–30 bar:n paineissa ja normaalilämpötiloissa. (Ellman ym. 2002.)

Ideaalikaasun tilanyhtälö perusmuodossaan

$$pV = mRT \quad (1)$$

jossa  $p$  on absoluuttinen paine,  $V$  on tilavuus,  $m$  on kaasun massa,  $R$  on ilman ominaiskaasuvakio (287 J / kgK) ja  $T$  on absoluuttinen lämpötila. Ideaalikaasun käsitteeseen liittyy läheisesti myös Daltonin osapainelaki, joka sanoo että kaasuosoksen (ilma) paine tietyssä tilavuudessa on yhtä suuri kuin sen kaasujen osapaineiden summa. Kaasun paine sen ollessa yksinään samassa tilavuudessa on sama kuin kaasun osapaine. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Virtauslajeista ja niiden profiileista (KUVIO 2.) puhuttaessa tarkoitetaan yleensä laminaarista ja turbulenttista virtausta. Laminaarinen tarkoittaa pyörteetöntä, pinnanmyötäistä, jatkuvaa virtausta.

Laminaarisen virtauksen nopeusprofiili ottaa parabolisen muodon, suurimman virtausnopeuden ollessa keskellä putken poikkileikkausta. Turbulenttinen virtaus tarkoittaa pyörteilevää, irtoilevaa virtausta. Tämän tyyppinen virtaus aiheuttaa kitkaa laminaarista enemmän.

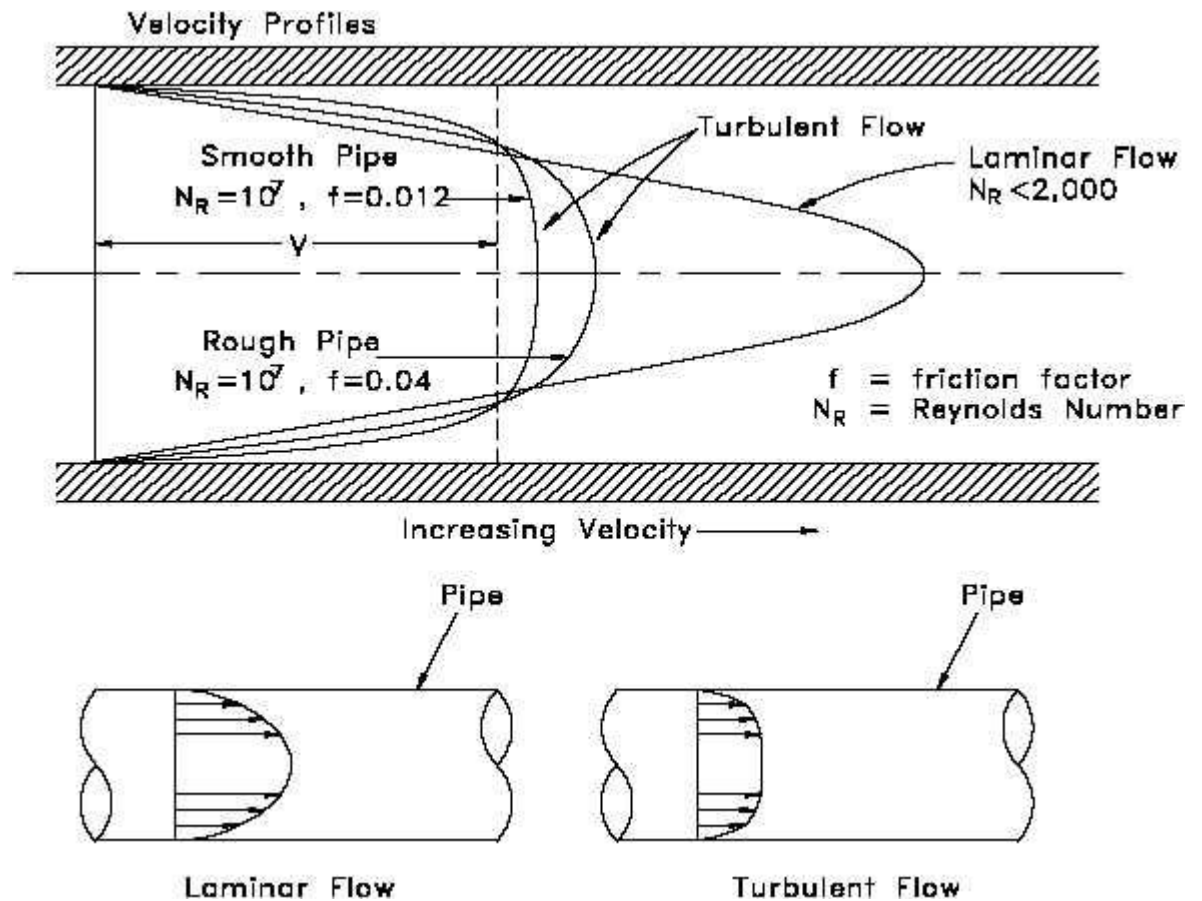
Siitä aiheutuu lämpenemistä ja pneumaattisen järjestelmän hyötysuhteen alenemista. Molempia virtauslajeja käytetään kuvaamaan virtausta putkistossa, venttiileissä ja toimilaitteissa. Turbulenttisen virtauksen matemaattinen mallintaminen on erittäin vaikeaa ja se onnistuu nykytiedon mukaan parhaiten osittaisdifferentiaaliyhtälöillä. (Douglas ym. 2005.)

Pneumatiikassa käytetäänkin Reynoldsin lukua määrittämään virtauksen laminaarisuus tai turbulenttisuus. Reynoldsin lukuun ( $Re$ ) vaikuttaa virtausnopeus ( $v$ ), putken sisähalkaisija ( $D$ ), kaasun tiheys ( $\rho$ ) ja kaasun dynaaminen viskositeetti ( $\mu$ ). Myös putken sisäpinnan karheudella on vaikutusta virtaukseen. (Douglas ym. 2005.)

Reynoldsin luvun laskuyhtälö

$$Re = Dvp / \mu \quad (2)$$

Putken pieni pinnankarheus kulkee usein käsi kädessä laminaarisen virtauksen kanssa. Pieni Reynoldsin luku ( $< 2100$ ) putkivirtauksessa tarkoittaa, että virtaus on laminaarista ja suuri luku ( $> 4000$ ) että virtaus on turbulenttista. Virtaus voi olla myös ajoittain laminaarista ja ajoittain turbulenttista, jolloin Reynoldsin luku vaihtelee pienen ja suuren välillä (2100-4000). (Douglas ym. 2005.)



KUVIO 2. Virtausnopeusprofiilit. (M-Tec 2009.)

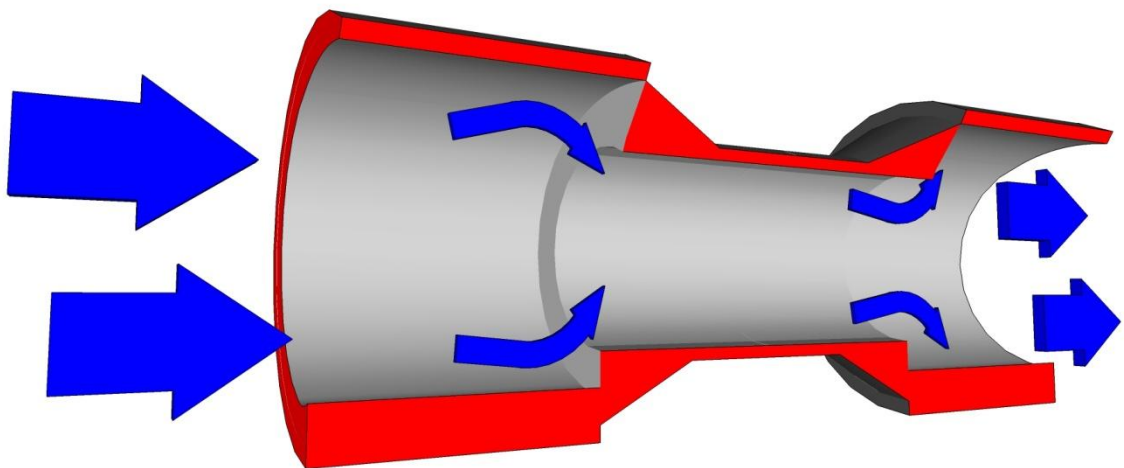
Virtausnopeuteen liittyy läheisesti Bernoullin laki, joka sanoo että virtausnopeuden kasvaessa staattinen paine pienenee ja virtausnopeuden pienentyessä staattinen paine kasvaa. Muutokset paineessa ja virtausnopeudessa johtuu siitä, että tilavuusvirran tulee pysyä vakiona. Laki voidaan esittää myös matemaattisena yhtälönä. Bernoullin yhtälö kuvaa virtauksen eri muuttujien suhteita toisiinsa ja pätee sekä nesteille että kaasuille, tosin eri muodoissa. Kaasuille voidaan potentiaalienergia olettaa nolllaksi, mutta ominaistilavuus ei ole vakio, vaan muuttuu adiabaattisesti. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Bernoullin yhtälö kaasuille

$$\left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right) \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{w_1^2}{2} = \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right) \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{w_2^2}{2} \quad (3)$$

jossa  $p_1$  ja  $p_2$  ovat paineita putken eri kohdissa,  $\rho_1$  ja  $\rho_2$  ovat tiheyksiä putken eri kohdissa,  $w_1$  ja  $w_2$  ovat virtauksen tekemä työ putken eri kohdissa sekä  $\kappa$  on adiabaattivakio. Adiabaattivakion arvo kaksiatomisilla kaasuilla on 1,4. (Douglas ym. 2005.)

Kyseinen laki tulee ilmi venturi-ilmiössä (KUVIO 3.), jossa ilma virtaa putkessa olevan kuristuksen läpi. Kuristuksen kohdalla virtausnopeus kasvaa ja staattinen paine pienenee. Bernoullin yhtälöä käytetäänkin usein venturi-ilmiön aiheuttamien muutoksien ratkaisemiseksi. Aikaisemmin mainittu tilavuusvirta ( $q$ ) on virtausnopeuden ( $v$ ) ja putken poikkipinta-alan ( $A$ ) tulo, joka on yksi keskeisistä suureista pneumatiikassa. Tilavuusvirta kertoo kuinka paljon ilmaa kulkee tietyn paikan ohi aikayksikössä. Tilavuusvirran virallisena yksikkönä käytetään  $\text{m}^3/\text{s}$ , mutta on usein käytännöllisempää puhua litroista minuutissa ( $\text{l}/\text{min}$ ). (Douglas ym. 2005.)



KUVIO 3. Venturi-ilmiö.



Kaasun viskositeetista puhuttaessa tarkoitetaan kaasun sisäistä kitkaa, josta yleisemmin puhutaan kaasun juoksevuutena. Viskositeetti kuvaa kaasun kykyä vastustaa virtausta ja se aiheuttaa leikkausvoiman kaasumolekyylien välille. Viskositeettia on kahdenlaista, dynaamista ( $\mu$ ) ja kinemaattista ( $\nu$ ). Kinemaattinen viskositeetti lasketaan jakamalla dynaaminen viskositeetti kaasun tiheydellä. Pneumatiikkajärjestelmässä viskositeetti kuluttaa suuren osan ilman liike-energiasta. Energia muuttuu lämmöksi ja aiheuttaa tehohäviötä, joka täytyy jo suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon. (Douglas ym. 2005.)

Paineella tarkoitetaan voiman ( $F$ ) kohdistumista kohtisuoraan tiettyä pinta-alaa ( $A$ ) kohti ja lasketaan siis jakamalla voima pinta-alalla. Paine voi olla staattista, dynaamista tai absoluuttista. Staattinen paine tarkoittaa kaasun aiheuttamaa painetta ollessaan paikallaan. Dynaamista painetta kutsutaan usein myös patopaineeksi, koska se syntyy kaasun liikkeen aiheuttamana ja sen arvoon vaikuttaa kaasun tiheys ja virtausnopeus. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Paine usein synnytetään kompressorissa puristamalla ilmaa kokoon ja sillä tuotetaan esimerkiksi paineilmasylinterin mäntään voima, jolla se saadaan liikkeelle. Vallitsevalla ympäristön paineella tarkoitetaan ilmakehän massan aiheuttamaa noin 1 bar:n suuruista hydrostaattista painetta maan pinnalle. Ylipaine tarkoittaa painetta joka ylittää kyseisen paineen. Paineen laskiessa alle ympäröivän, puhutaan alipaineesta. Paine voi teoriassa myös laskea 0 bar:iin ja sitä kutsutaan tyhjiöksi. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

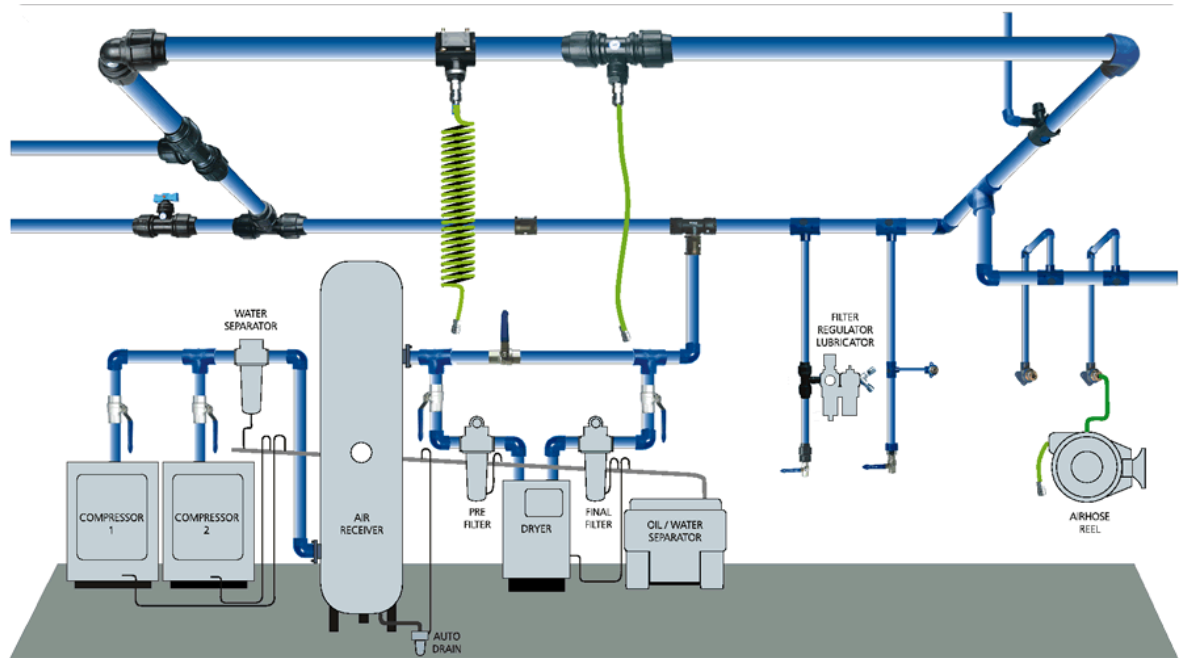
Paineen yksikkönä bar:n lisäksi käytetään usein pascalia (Pa) ja sen kerrannaista MPa, joka tarkoittaa miljoonaa pascalia. Yksi bar on  $10^5$  pascalia. Pascal-nimeä käytetään juuri voiman ja pinta-alan osamäärästä eli  $N/m^2$ , joka on virallinen SI-järjestelmän mukainen yksikkö. Painehäviöitä järjestelmässä aiheuttaa kaikki komponentit, toimilaitteet ja niiden väliset putkistot. Normaali pneumatiikkajärjestelmässä käytettävä painetaso on noin 4-10 bar. (Ellman ym. 2002; Douglas ym. 2005.)

Pneumatiikan teoreettinen tarkastelu on tärkeää, jotta ymmärrettäisiin paremmin esimerkiksi ilman käyttäytymistä eri tilanteissa, paineen muodostumista ja lämpötilan vaikutusta paineeseen ja tilavuuteen. Virtausmekaniikan ja termodynamiikan ilmiöiden tunteminen on hyödyllistä paineistetun ilman käyttäytymisen ja ennustettavuuden kannalta sekä antaa eväät laskuyhtälöiden ratkaisemiseen. Tulevaisuudessa voi paineistetun ilman tarkastelu olla vieläkin teoreettisempaa ja päästään hiukkastasoja pienempien kokonaisuuksien äärelle, joissa ei enää klassisen fysiikan laeilla ole niin suurta merkitystä vaan silloin hallitsevat kvanttimekaniikan lait.

Teorian ja laskennan opetus on perustana käytännön sovelluksille ja sitä opettaankin molemmilla tutkimuksen kohteina olevilla opetusasteilla. Alemmalla koulutusasteella teoria yleensä painottuu eri ilmiöiden ja lakien, kuten Bernoullin lain ja venturi-ilmiön, oppimiseen. Ylemmällä koulutusasteella tarkastellaan usein pneumatiikkaa molekyyalitasolta asti ja laskentakin käsittää useiden kaavojen ja yhtälöiden soveltamista. Myös nomogrammien ja diagrammien tulkinta korostuu ammatikorkeakouluopetuksessa. Sellaiset teoriaan liittyvät käsitteet kuten ideaalikaasu, Bernoullin laki sekä paineen, lämpötilan ja tilavuuden yhteys tulisi opettaa kaikilla koulutusasteilla koska niihin törmää jatkuvasti pneumaattista järjestelmää tarkasteltaessa. Painehäviöt, ilman kosteus ja energian muuttuminen lämmöksi ovat myös tärkeitä aiheita, joita ei tulisi sivuuttaa.

### **3.3 Komponentit ja toimilaitteet**

Komponenteiksi ja toimilaitteiksi luetaan paineilman tuottamiseen, sovittamiseen, ohjaamiseen ja lopulliseen käyttökohteeseen liittyvät laitteet. Normaaliin teollisuudessa käytettävään paineilmajärjestelmään (KUVIO 4.) kuuluu yleensä kompressor, jälkikäsittelyyn liittyvät laitteet, säiliö, sovitus- ja ohjausventtiilit, putkisto ja toimilaitteet. Erilaisia komponentteja on lukuisia ja niitä voidaan käyttökohteesta riippuen muokata tai suunnitella kokonaan uusia. Hyvä esimerkki pneumatiikan erikoissovelluksesta on Formula 1-moottoreissa käytettävät paineilmakäyttöiset venttiilikoneistot. (Kärkkäinen ym. 2000; Bell 1997.)



KUVIO 4. Tyypillinen paineilmajärjestelmä. (MTI 2009.)

Kompressorinimitystä käytetään yleisesti laitteille, joilla voidaan nostaa paine vähintään kaksinkertaiseksi imupaineeseen verrattuna. Pienemmän paineen tuottavia kutsutaan puhaltimiksi. Kompressorilla synnytetään paineistettu ilma järjestelmän käyttöön. Kompressorityyppejä on monenlaisia, mutta kaikki ovat periaatteeltaan samanlaisia eli ne puristavat ilmaa kokoon. Ilma puristuu kokoon puristuselementtien avulla kompressoripesässä. Kompressorityypin nimi tulee puristuselementin tyypistä kuten ruuvikompressor, mäntäkompressor, lamellikompressor tai kalvokompressor. Kompressorit jaetaan myös puristustavan mukaan eri kategorioihin: staattisesti puristaviin, kineettisesti puristaviin ja vastavirtapuristusta käyttäviin. Staattisesti puristaviin kuuluvat mäntätyyppiset ja pyörivätyyppiset kompressorit. Kineettisesti puristaviin kuuluvat radiaali- ja aksiaalikompressorit, jotka molemmat käyttävät puristuselementteinä siipiä. Vastavirtapuristusta käyttäviin kuuluu kiertomäntäpuhallin. Kompressoria käytetään yleensä sähkömoottorilla. (Kärkkäinen ym. 2000.)

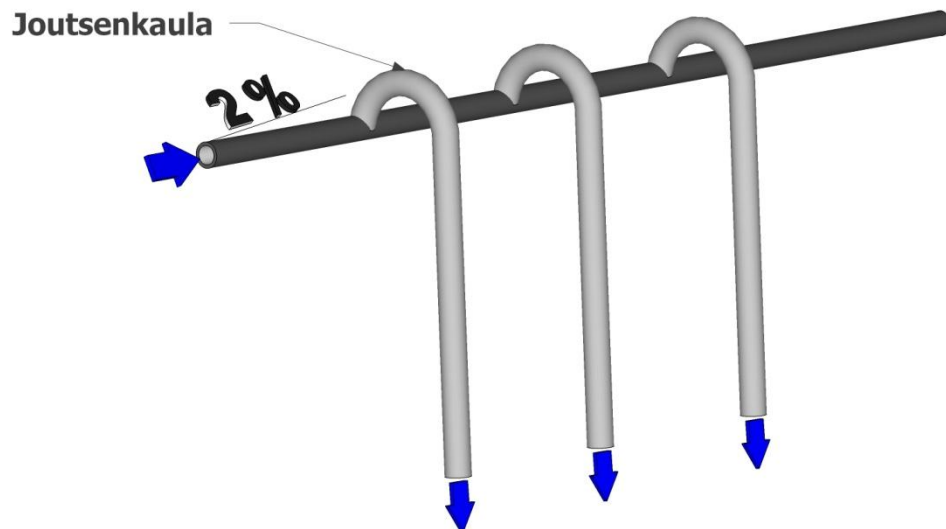
Kompressorilta tulevan paineilman lämpötila on korkea kompressorin liikkuvien osien kitkasta johtuen, joten ilma täytyy jäähdyttää järjestelmään sopivaksi. Jäähdytyksessä ilma tiivistyy ja ilman kosteus kondensoituu ja muuttuu vedeksi.

Kosteudesta aiheutuvan korroosion ehkäisemiseksi täytyy vesi poistaa järjestelmästä käyttämällä esimerkiksi uimureita, jotka keräävät kondenssiveden jäähdyttimen alaosaan. (Kärkkäinen ym. 2000; Uicker ym. 2003.)

Jäähdyttimen jälkeenkin ilma on kostea ja sitä ei voi kaikki komponentit tai toimitteet käyttää, joten se täytyy kuivata. Kuivaaminen tapahtuu yleensä adsorptiokuivaimella, jossa ilma kulkee adsorptioaineen lävitse. Aine poistaa ilmasta vesihöyryn melkein kokonaan. Toinen ilman kuivaustapa on käyttää sykklonia, jossa ilma tulee sykklonin yläosasta sisään ja kulkeutuu pyörien sykklonin alaosaan. Pyörimisliikkeen synnyttämä keskipakovoima pakottaa raskaamman aineen (veden) sykklonin reunoille ja näin erottaa veden ilmasta. Kuiva ilma pääsee järjestelmään sykklonin yläosasta, eri liitännästä kuin mistä se sinne tuli. Kuivauksen etuina ovat laitteiden kestoiän parantuminen ja korjausten väheneminen. (Kärkkäinen ym. 2000; Douglas ym. 2005.)

Paineilmaa voidaan varastoida säiliöön ja paineilmaverkoston putkistokin voi toimia säiliönä. Varastoiminen on hyödyllistä, koska silloin kompressoria ei tarvitse koko ajan pitää käynnissä. Säiliössä ilma jäähtyy ja säiliön pohjassa onkin venttiili tai uimuri veden poistoon. Säiliö toimii myös paineakun tavoin tasoittamalla kompressorilta tulevia paineiskuja. (Keinänen ym. 2005.)

Putkistoja pitkin paineilma ohjataan toimitteille ja instrumenteille. Jotkut komponentit tarvitsevat öljyvoitelun ja siksi järjestelmässä onkin usein sumuvoitelulaitte, joka annostelee ilmavirran mukaan sumumaista öljyä. Öljyn tarkoituksena on voidella komponenttien liikkuvat osat. Riippuen paineilman käyttökohteesta ennen komponenttia voi vielä olla erillisiä kuivaimia, vedenerottimia, suodattimia tai muita ilman laatuun vaikuttavia laitteita. Paineilmaputkiston kaltevuuden tulisi olla noin 2 %, jotta kondenssivesi valuisi pois putkistosta. Myös joutsenkaulojen käyttö (KUVIO 5.) on suositeltavaa putkirakennelmassa, ettei synny paikkoja joissa vesi pääsisi makaamaan putkistossa. (Kärkkäinen ym. 2000; Keinänen ym. 2005.)



KUVIO 5. Putkiston suositeltava rakenne.

Venttiilien tehtävänä järjestelmässä on ohjata, säätää ja sovittaa paine ja tilavuusvirta sopivaksi eri käyttökohteille. Yleisimpinä venttiilityyppeinä voidaan pitää varo- ja sulkuventtiilejä, jotka yleensä kaikista järjestelmistä löytyvätkin. Varoventtiilien tehtävänä on päästää ylimääräinen paine pois järjestelmästä ja ehkäistä liian korkean paineen rikkomasta komponentteja. Varoventtiilejä voi olla useissa paikoissa tarpeen mukaan, mutta yleisin varoventtiilin paikka on paineilmasäiliön päällä. Sulkuventtiilillä voidaan sulkea koko linja ja estää ilman pääsy eteenpäin. Esimerkiksi suodattimen molemmiin puolin olevilla sulkuventtiileillä voidaan sulkea linjat ja huoltaa suodatin turvallisesti paineiden karkaamatta järjestelmästä. (Kärkkäinen ym. 2000.)

Suuntaventtiileillä ohjataan painetta toimilaitteille ja määrätään esimerkiksi sylinterin liikesuunta ja moottorin pyörimissuunta. Tämänäyttöisissä venttiileissä on joko istukka tai luisti, jonka asentoa muuttamalla voidaan avata ja sulkea virtauskanavia toimilaitteelle halutun toiminnon aikaansaamiseksi. Suuntaventtiilien merkintätapana käytetään venttiiliin tulevien liitäntöjen ja venttiilin eri asentojen lukumääriä. Esimerkiksi 5/2-suuntaventtiili tarkoittaa, että venttiilissä on viisi eri liitäntää: yksi paineen tuloliitäntä, kaksi paineen lähtöliitäntää ja kaksi poistokanavaa. Venttiilillä on myös kaksi eri mahdollista asentoa, joiden perusteella ilma virtaa haluttua reittiä. (Kärkkäinen ym. 2000.)

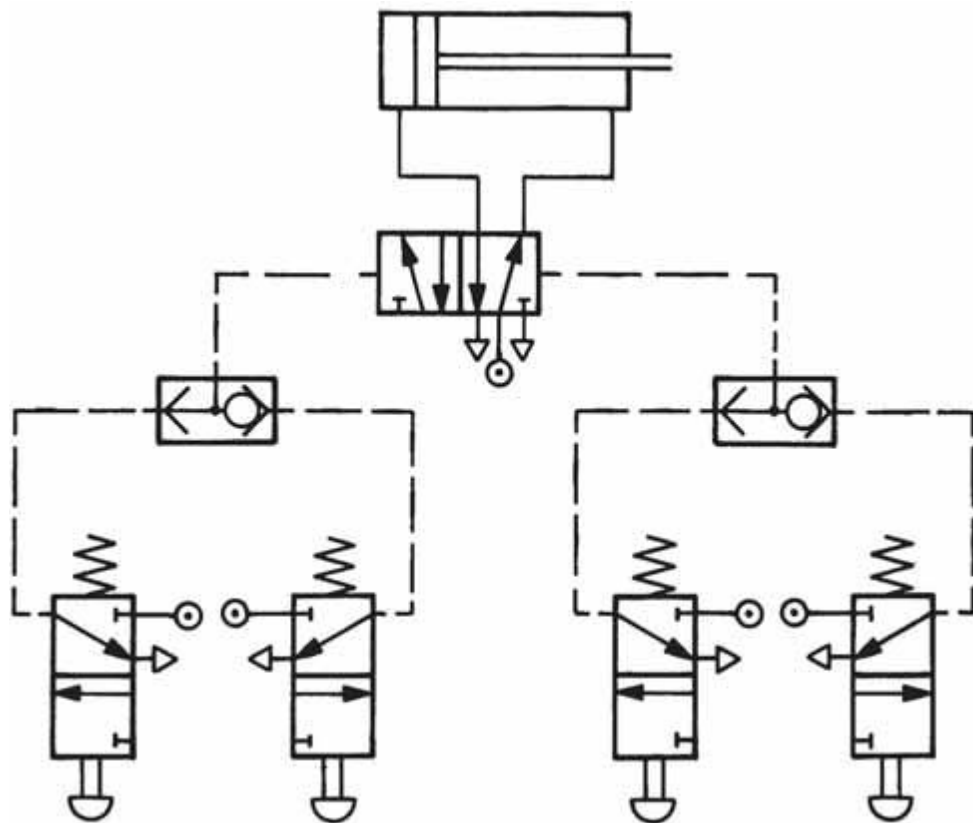
Asennonvaihto eli ohjaus venttiilissä voi tapahtua monella tavoin. Venttiili voi olla suoraan ohjattu tai esiohjattu. Suoraan ohjatuissa venttiileissä hallintamekanismi on suoraan yhteydessä luistiin ja liikuttaa sitä esimerkiksi solenoidin karan avulla. Solenoidin käämiin johdettu sähkövirta synnyttää magneettikentän, joka saa aikaan sähkömotorisen voiman mikä taas saa karan liikkeelle. Kara liikuttaa luistia ja näin avaa paineella halutun kanavan. Esiohjatussa venttiilissä on erillinen esiohjausosa, joka päästää paineen vaikuttamaan pääluistin toiseen pätyyn halutun liikkeen aikaansaamiseksi. Sähköinen ohjaus mahdollistaa myös proportionaali- ja servoventtiilien käytön, joilla venttiilin asennon säätäminen saadaan portaattomaksi ja paineilman ohjaus tarkemmaksi. Tällaisissa venttiileissä karan asema riippuu solenoidin käämiin johdetun sähkövirran suuruudesta. Venttiilin asentoa voi myös ohjata painonapilla tai vivulla ja niitä kutsutaan lihasohjatuiksi venttiileiksi. Joissakin tapauksissa venttiilirakenteessa oleva jousi ohjaa venttiilin toiseen asentoon, kun sitä ei erikseen ohjata. Venttiilit (KUVIO 6.) eivät tarvitse paluukanavaa säiliöön, koska paineilma voidaan päästää suoraan poistokanavasta järjestelmää ympäröivään ilmaan. (Kärkkäinen ym. 2000; Keinänen ym. 2005.)



KUVIO 6. Pneumatiikkaventtiilejä. (Mediakolmio.)

Järjestelmissä on usein myös vastaventtiilejä, joiden tehtävänä on sallia virtaus vain yhteen suuntaan. Toisin sanoen venttiili sallii vapaan virtauksen toiseen suuntaan ja estää virtauksen kokonaan toiseen suuntaan. Vastusvastaventtiileillä ohjataan esimerkiksi toimilaitteen nopeutta. Tämänäntyyppiset venttiilit vastustavat virtausta toiseen suuntaan ja päästävät virtauksen toiseen suuntaan.

Virtauksen vastustusta voidaan säätää yleensä venttiilissä olevasta säätönupista. Vaihtovastaventtiileissä (KUVIO 7.) on kaksi ohjauskanavaa ja yksi pääkanava. Venttiili avautuu kun toiseen tai molempiin ohjauskanaviin tulee paine. Tällaista venttiiliä tarvitaan esimerkiksi, silloin kun toimilaitetta pitää voida ohjata kahdesta eri paikasta. (Kärkkäinen ym. 2000.)



KUVIO 7. Sylinterin ohjaus vaihtovastaventtiileillä. (Hulkkonen 2008.)

Myös monia muita venttiilityyppejä kuten virta- ja letkurikkoventtiilejä käytetään pneumatiikassa. Virtaventtiilien tehtävänä on säätää tilavuusvirtaa ja letkurikkoventtiili sulkee linjan jos jostain vuotaa ilmaa ympäristöön letkun tai komponentin rikkoontumisen seurauksena. Kehittyneimmissä logiikkaohjausta käyttävissä järjestelmissä hyödynnetään myös erilaisia ajastimia, laskureita ja painekeytkimiä optimoinnin lisäämiseksi. (Kärkkäinen ym. 2000.)

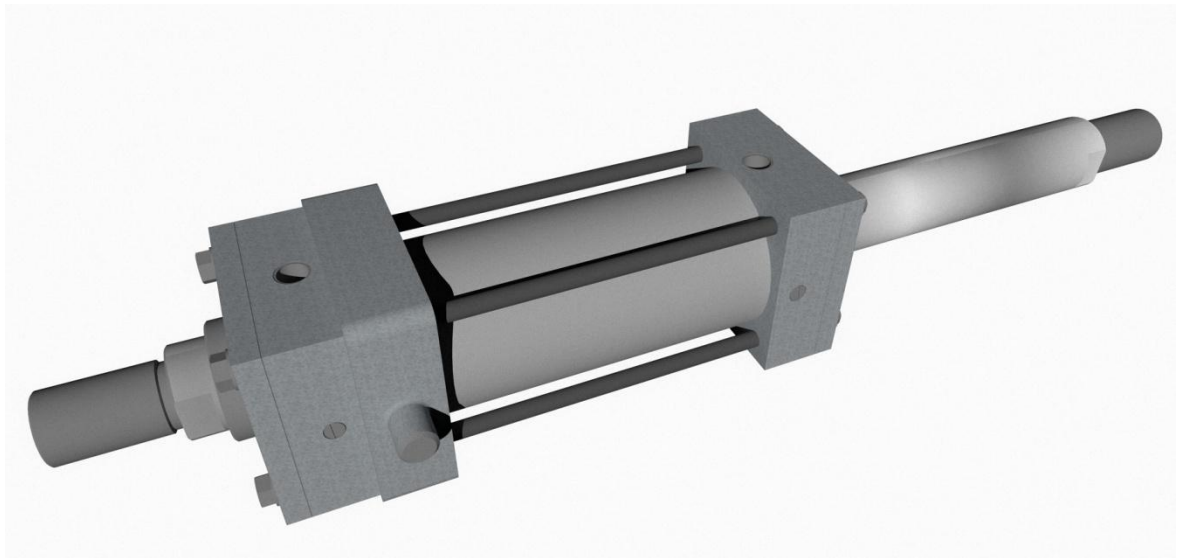
Paineilmajärjestelmän viimeisenä vaiheena on toimilaite tai työkalu, jonka käyttämiseen paineistettu ilma on alun perin tuotettu. Toimilaite on usein jokin sylinteri, jolla siirretään kuormaa, moottori tai työkalu. Sylinteriä käytetään useimmiten lineaariseen liikkeeseen, mutta myös pyörivä liike on mahdollista saada aikaan. Sylinterin tuottaman voiman voi laskea kertomalla mäntään vaikuttavan paineen männän poikkipinta-alalla. Sylinteri voi palautua oman tai ulkoisen massan vaikutuksesta, kun painetta ei kohdisteta mäntään. Joissain sylintereissä on palautusjoussi, jonka voimalla saadaan mäntä liikkumaan takaisin alkuasentoonsa. Sylinterin männän liikettä ulospäin kutsutaan plus-liikkeeksi ja sisäänpäin miinus-liikkeeksi. (Keinänen ym. 2005.)

Mahdollista on myös kaksitoimisten sylintereiden käyttö, joissa paineella ohjataan mäntää molempiin suuntiin. Tällöin toiseen suuntaan syntyvä voima on pienempi, koska pinta-ala johon paine vaikuttaa, on myös pienempi männänvarren poikkipinta-alan viemän tilan vuoksi. Silloin tehollinen pinta-ala lasketaan männän ja männänvarren poikkipinta-alojen erotuksena. Jos kyseessä on symmetrinen sylinteri (KUVIO 8.), männässä on varret molemmin puolin, jolloin voimakin on yhtä suuri molempiin suuntiin paineen ollessa sama. (Keinänen ym. 2005; Ellman ym. 2002.)

Uppomäntä- ja teleskooppisylinterit ovat harvinaisempia, mutta käytössä kuitenkin niille sopivissa käyttökohteissa. Uppomäntäsylinterissä ei ole erillistä männänvartta, vaan mäntä toimii samalla vartena. Tällainen sylinterityyppi on jäykkä ja sopii tilanteisiin, joissa mäntään kohdistuu myös sivuttaisvoimia. Teleskooppisylinteri sisältää useita mäntiä ja toimii vaihteittain. Teleskooppisylinterillä saadaan pitkä liikematka aikaan, mutta sylinteri menee kuitenkin pieneen tilaan. (Keinänen ym. 2005; Ellman ym. 2002.)

Moottoreissa ja työkaluissa käytetään useimmiten pyörivää liikettä ja yleisin paineilmatyökalu onkin hiomalaite, jonka laikkaa pyöritetään. Pyörivä liike saadaan aikaan esimerkiksi kohdistamalla paine laakeroidun akselin lamelleihin tai siipipyörään. Pyörivä liike on tarpeellinen kaikissa vääntöä tarvitsevilla käyttökohteilla. (Kärkkäinen ym. 2000; Douglas ym. 2005.)





KUVIO 8. Symmetrinen sylinteri.

Paineilmaa voidaan myös käyttää esimerkiksi puhaltimissa, suuttimissa ja rengaspaineen säätämisessä. Näissä sovelluksissa hyödynnetään suoraan ilman paineistettua olomuotoa tai virtausnopeuden muutoksia ja ne soveltuvat hyvin varsinkin räjähdysherkkiin ympäristöihin. Näihin sovelluksiin kuuluu myös jo nykyään harvemmin käytetty putkiposti, jolla siirretään postia esimerkiksi laboratorioissa osastojen välillä. (Kärkkäinen ym. 2000.)

Uusin innovaatio pneumatiikan komponenteissa on paineilmatoiminen lihas, jonka toiminta on samantyyppistä kuin ihmisen hauislihas. Paineistettaessa lihas, verkomainen rakenne, muuttaa muotoaan. Lihaksen pituus pienenee, maksimissaan noin 25 %, ja halkaisija kasvaa. Tällaisella toimilaitteella saadaan aikaan noin 10 kertaa enemmän voimaa kuin saman halkaisijan omaavalla sylinterillä. Muita etuja ovat kevyt rakenne, vuotamattomuus, kitkaton toiminta ja tarkat liikkeet. Liikkeiden tarkkuus perustuu aikaisemmin mainittujen proportionaaliventtiilien kaltaiseen toimintaan, joissa asemaa säädetään portaattomasti. (Keinänen ym. 2005.)

Pneumatiikka tulee edelleen kilpailemaan hydraulisten ja sähköisten järjestelmien kanssa samoissa sovelluskohteissa. Ilman kosteuskin on edelleen suuri ongelma, jonka hallitseminen tulee kehittymään tulevaisuudessa eri vettä sitovien materiaalien kehittyessä. Tulevaisuudessa tullaan todennäköisesti käyttämään myös älykkeitä ohjausjärjestelmiä, jotka perustuvat esimerkiksi digitaalisesti ohjattuihin venttiililohkoihin. Lohkojen venttiilejä ohjataan nopeasti kiinni ja auki, joten niillä pystytään hoitamaan sekä suuntaventtiilien, virtausventtiilien että paineenrajoitusventtiilien tehtävät.

Järjestelmien vianhaku ja diagnostiikkakin tulee parantumaan esimerkiksi langattomien tiedonsiirtojärjestelmien myötä. Tunnistimet eri puolilla paineilmajärjestelmää lähettävät signaalin langattomasti vastaanottimeen, jonka omaan järjestelmään tallentuu eri painetasot, lämpötilat ja venttiilien asennot. Tietojen perusteella voidaan rajata mahdolliset ongelmakohdat ja kehittää niitä paremmiksi. Langattoman järjestelmän ohjainlaite voisi lähettää tekstiviestinä työnjohtajalle tiedon esimerkiksi suodattimen vaihdon ajankohtaisuudesta tai järjestelmän vakavasta viasta. Langattomuus myös vähentää sähköjohtojen määrää ja mahdollisesti kustannuksia.

Komponenttien ja järjestelmän toiminnan opetuksessa käytetään havainnollisuutta parantamaan usein Feston valmistamaa Fluid Sim -ohjelmistoa. Se on käytössä molemmilla koulutusasteilla ja tarjoaa interaktiivisuutta opetuksen avuksi. Kuvamateriaalina kuitenkin lähes poikkeuksetta ovat piirrosmerkit ja 2D-kuvat, joiden havainnollisuus on huono verrattuna 3D-kuviin ja valokuviin. Havainnollisuuteen ja kuvamateriaaliin toivottiinkin parannusta.

Komponenttien toimintalogiikan ymmärtämistä ja käyttökohteita opetetaan pääasiassa teoreettisesti ja käytännön kytkennät jäävät pienemmälle huomiolle. Tätä varten kehitetty testipenkki olisikin oiva lisä opetukseen. Sähköpneumatiikan opetus tulee lisääntymään järjestelmien automatisoituessa koko ajan enemmän. Sen opetukseen panostaminen tulee varmasti olemaan kannattavaa.

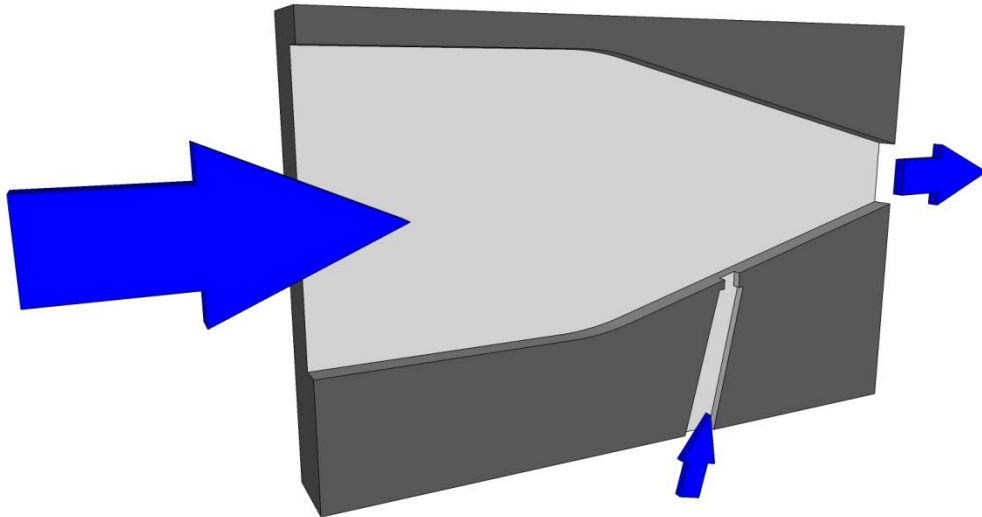
### 3.4 Alipainetekniikka

Paineen laskiessa alle ilmakehän paineen puhutaan alipaineesta. Poistettaessa suljetusta tilasta ilmaa tilan ilman paine pienenee ja tilavuus kasvaa. Syntynyttä paine-eroa hyödynnetään erilaisissa sovelluksissa. Jos painetta lasketaan normaalista ilmakehän paineesta (1,013 bar) esimerkiksi puolet, on absoluuttinen paine silloin noin 0,5 bar. (Ellman ym. 2002.)

Alipainetta hyödynnetään esimerkiksi robottien imukupitarttujissa, imureissa ja ajoneuvojen jarrutehostimissa. Paine-ero ympäristön kanssa saa aikaan voiman, jota käytetään hyväksi erilaisten toimintojen aikaansaamiseksi. (Ellman ym. 2002.)

Alipainetta tuotetaan yleensä joko ejektorilla tai alipainepumpulla. Alipainepumppu toimii imemällä ilmaa suljetusta tilasta ja sitten puhaltamalla sen ympäröivään ilmaan. Pumppu toimii kuten kompressori, mutta käänteisesti. Alipainepumpun jäähdytykseen tulee kiinnittää huomiota, koska se lämpenee huomattavasti helpommin kuin kompressori. Se johtuu siitä, että paineen laskiessa laskee myös massavirta ja jossain vaiheessa pumppu absorboi kaiken lämmön itseensä. (Ellman ym. 2002.)

Ejektorilla tuotetaan alipaine ilman virtausnopeuden muutosta hyödyntämällä. Kuten aikaisemmin todettiin (ks. Luku 3.2), Bernoullin laki sanoo, että virtausnopeuden kasvaessa staattinen paine pienenee. Ejektorien toiminta perustuu siis venturi-ilmiöön, jossa ilmaa puhalletaan kuristuksen kautta ympäröivään ilmaan. Ejektoreita on olemassa yksi- (KUVIO 9.) ja monivaiheisia. Monivaiheisella saavutetaan suurempi hyötysuhde, joskin se on myös kalliimpi. Alipaineen suuruuteen voidaan vaikuttaa säätämällä ejektorin syöttöpainetta. Sovelluksissa, joissa halutaan nopea alipaineen syntyminen pienellä ilman kulutuksella, käytetään ejektoria. Ejektorit sopivatkin hyvin hetkellisten alipaineiden synnyttämistä varten, mutta jatkuvaa alipainetta tarvittaessa on alipainepumppu parempi vaihtoehto. (Ellman ym. 2002.)



KUVIO 9. Yksiasteinen ejektori.

Alipainetekniikkaan liittyen, molemmilla koulutusasteilla opetetaan komponentit ja käyttökohteet. Tarkempi teoreettinen tarkastelu, kuten alipaineen syntyminen ja sen suuruuden säätäminen, opetetaan pääasiassa ammattikorkeakoulussa. Aikaisemmin mainittu testipenkki voisi soveltua myös ejektoreiden kytkentöjen ja käytön opetukseen. Alipainetekniikan komponentit voisivat olla vaikka laajennettava lisäosa, jonka oppilaitos voisi halutessaan hankkia.

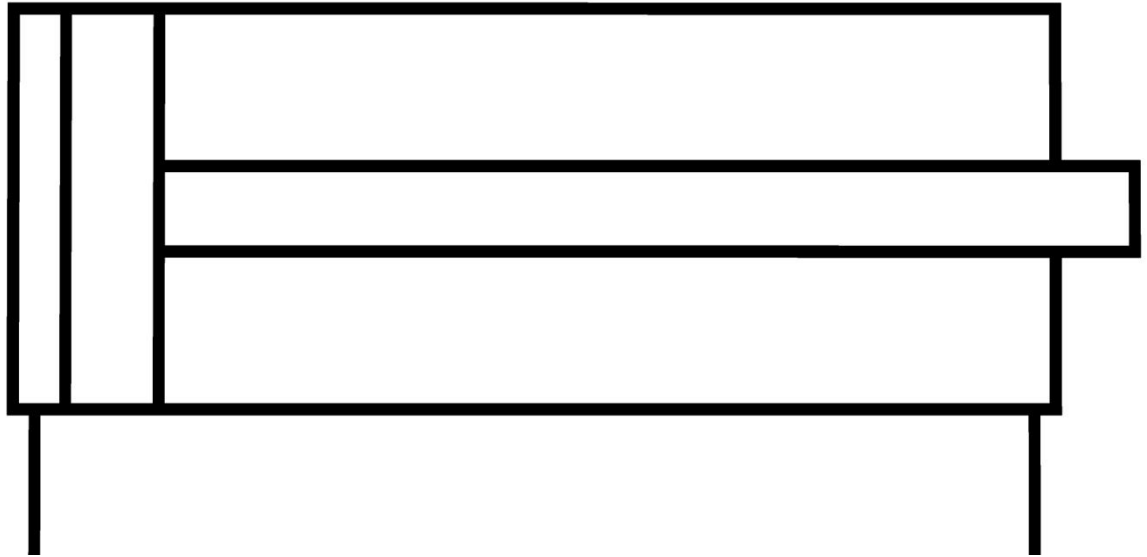
### 3.5 Järjestelmäsuunnittelu

Pneumaattisen järjestelmän tavoitteena on siirtää tehoa, mielellään mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Olisi myös toivottavaa, että järjestelmä vaatisi vain vähän huoltoa ja se olisi nopeaa ja helppoa. Järjestelmän saaminen toimivaksi kokonaisuudeksi vaatii tietotaitoa niin komponenttien mitoittamisesta kuin eri standardeistakin. Suunnitteluprosessiin kuuluu eri komponenttien mitoittamisen ja niiden valitsemisen lisäksi piirrosmerkit ja piirikaaviot. Piirikaaviosta näkyy järjestelmän kaikki komponentit piirrosmerkkeinä. Putkistot näkyvät usein viivoina komponenttien välillä. Järjestelmän toiminnan kannalta oleelliset tiedot ja huomautukset on myös syytä tuoda esille suunnitteluvaiheessa ennen käyttöönottoa. Virtausmekaniikan ja termodynamiikan tunteminen auttaa ennustamaan mahdollisia ongelmakohtia järjestelmässä ilman käyttäytymisen kannalta. (Kärkkäinen ym. 2000; Keinänen ym. 2005.)

Standardisoinnin tarkoituksena on yksinkertaistaa järjestelmiä, parantaa turvallisuutta ja komponenttien yhteensopivuutta. Nämä taas johtavat kustannussäästöihin ja suunnittelun helpottumiseen. Komponenttien yhteensopivuus mahdollistaa eri valmistajien komponenttien käyttämisen samassa järjestelmässä. Myös varaosat ja suunnitteluvaiheessa valmistajan luettelosta valitut osat ovat helposti saatavilla. (Keinänen ym. 2005.)

Sylinterit ovat ISO-standardisoituja kiinnityksiä myöten, mikä helpottaa niiden valitsemista käyttökohteen mukaan. Sylinterihalkaisijat aina 8 mm:stä 250 mm:iin määritellään eri standardeissa. Iskunpituudet ovat 25-1000 mm, jotka ovat määriteltä ISO 4393-standardissa. Sylinterin piirrosmerkkejä (KUVIO 10.) on useita riippuen sylinterityypistä. Sylinterin mitoittaminen yleensä alkaa tarpeesta. Minkälaista kuorman siirto- tai hallintakykyä sylinteriltä vaaditaan? Järjestelmän painetasen ja vaadittavan voiman perusteella voidaan laskea sylinterin männän poikkipinta-ala. Jos tiedetään poikkipinta-ala, sopiva sylinteri voidaan valita valmistajan luettelosta.

Sylinterin iskunpituus vaikuttaa liikutettavan kuorman liikematkkaan. Sylinterin tekemä työ onkin sen tuottaman voiman ja liikematkan tulo. (Kärkkäinen ym. 2000.)



KUVIO 10. Kaksitoimisen sylinterin piirrosmerkki.

Standardisointi pätee kaikille yleisimmille komponenteille ja toimilaitteille aina kiinnityksiä myöten. Se pätee esimerkiksi venttiileille, kompressoreille, moottoreille, säiliöille ja niin edelleen. Tärkeää suunnittelussa on ymmärtää painehäviöiden syntyminen ja kitkahäviöt. Kitka ilman ja putken välillä sekä ilmamolekyylien välinen kitka muuntavat osan energiasta lämpöenergiaksi. Paine- ja kitkahäviöitä voidaan pienentää hyvällä suunnittelulla. Kitkaan suuruuteen putkistossa vaikuttaa putkiston sisäpinnan karheus ja mutkat sekä ”kynnykset”. Kynnys on putken liitoskohdassa esiintyvä tasoero, joka synnyttää turbulenssia. (Ellman ym. 2002; Keinänen ym. 2005.)

Painehäviöitä synnyttää järjestelmän jokainen komponentti ja putkistokin. Valittaessa kompressoria paineilmajärjestelmään käytettävän työpaineen lisäksi tiedossa pitää olla kokonaispainehäviö ja se pitää lisätä kompressorilta vaadittavaan paineentuottokykyyn.

Täysin tarkkaa komponentin tai putkiston aiheuttamaa painehäviötä on erittäin vaikea laskea ja siksi käytetäänkin eri järjestelmän osille kertavastushäviöitä, jotka yhdessä antavat likimääräisen kokonaispainehäviön. Kompressorin painetuotto saakin olla hieman yli työpaineen ja painehäviöiden vaatiman paineentuottokyvyn, koska paine saadaan rajoitettua paineenrajoitusventtiilillä. Myös tilavuusvirran tuottaminen on kompressorin tehtävä ja maksimaalinen ilman tarve riippuu toimilaitteiden kulutuksesta. Paineilman tarve saadaan laskemalla kaikkien komponenttien maksimaalinen ilmapainepuhallus yhteensä. Siihen lisätään vielä vuodot ja mahdollinen tulevaisuuden laajennustarve. (Ellman ym. 2002; Keinänen ym. 2005.)

Paineilmajärjestelmien suunnittelu tulevaisuudessa muuttuu todennäköisesti radikaalisti erilaisten tietokonemallinnusten ja -simulointien avulla. Simulointi auttaa näkemään mahdolliset ongelmakohdat etukäteen ja mahdollisesti nähdään ilman kulku järjestelmässä ilmapartikkelin näkökulmasta virtuaalisesti.

Tietokoneohjelma voi valita tai suositella komponentteja tietokantaan ladattujen valmistajien luetteloista annettujen ehtojen ja toiveiden mukaisesti. Ohjelma piirtää myös valmiiksi piirikaavion järjestelmästä, jotka nekin todennäköisesti ovat interaktiivisia animaatioita.

Haastatteluissa tuli ilmi tarve paremmalle suunnittelun opettamiseen liittyvälle materiaalille. Opetuksen laatua voisi parantaa erilaisilla järjestelmien kytkentäharjoituksilla, joissa opiskelijat pääsisivät näkemään ja kokeilemaan oikeiden paineilmajärjestelmien kokoamista. Sitä varten tarvittaisiinkin monessa kohdassa mainittu testipenkki, jossa esimerkiksi erilaisten venttiilien ja sylinterien eri kytkennöillä vaikutettaisiin järjestelmän toimintaan. Myös painetasojen tarkkailu ja säätäminen toisi käytännön näkökulmaa järjestelmän eri piirien toimintaan. Joissain oppilaitoksissa tällainen testipenkki onkin, mutta sen käyttö jää silti vähäiseksi.

Joissain oppilaitoksissa on teorialentien lisäksi suunnitteluharjoituksia, mitkä myös arvioinnissa huomioidaan ja se on esimerkki hyvästä kokonaisvaltaisesta opetuksesta johon tulisi panostaa.

Oppilaitosten yhteistyö yritysten kanssa jää vähäiseksi ja siihen toivottiin parannusta. Opiskelijan ainoa kontakti alan yritykseen opiskelujen aikana saattaa olla vain työharjoittelun ajanjakso. Yritysten tarjoamat vierailumahdollisuudet ja jopa yrityksen edustajan pitämä luento pneumatiikasta olisikin oiva lisä opetukseen ja toisi uusia näkökulmia yritysmaailmasta.

Yritys voisi samalla esittää toiveensa tulevien työnhakijoiden osaamisesta ja kehittämistarpeista. Yrityksen antama tieto omista tarpeistaan ja työllistymismahdollisuuksista sekä etenemismahdollisuuksista omalla urallaan varmasti motivoisi opiskelijoita panostamaan pneumatiikan opiskeluun. Uskoakseni tämä pätee itse asiassa varmasti kaikilla aloilla ja osaamisalueilla.



## 4 UUSI OPINTOMATERIAALI

Työn tavoitteena oli määrittää tarve uudelle pneumatiikan verkkopohjaiselle opintomateriaalille. Tutkimalla ammattioppilaitosten ja ammattikorkeakoulujen opintooppaita ja opetusmateriaaleja sai hyvän käsityksen materiaalin nykyisestä laajuudesta ja tasosta. Opettajien haastattelut tarkensivat tutkimuksesta saatuja tietoja entisestään.

Jos tämän työn toimeksiantaja päättää uuden opintomateriaalin valmistamisesta tutkimustulosten perusteella, materiaali tulee verkkopohjaiseksi ja näin siihen on materiaalin tilaajien helppo päästä käsiksi. Pneumatiikan kurssi tulisi koostumaan eri osa-alueista, jotka ovat interaktiivisia ja havainnollistavia opintojaksoja. Havainnollisuutta parantavat 3D-kuvat ja animaatiot, jotka auttavat ymmärtämään asioita jo perusteista sekä soveltamaan niitä haasteellisimpiin asioihin ja käsitteisiin kurssin edetessä. Kurssi tulisi olemaan ProDiags-oppimisympäristössä ja joillain oppilaitoksilla onkin jo kokemusta verkkopohjaisista kursseista Moodle-oppimisympäristön kanssa. Kurssi mahdollistaa myös tehtävien ja kysymysten tekemisen samaan ohjelmaan, joilla voi hoitaa oppimisen seurannan ja opiskelijan arvioinnin.

Tutkimuksen tulosten perusteella olisi tarvetta uudelle opintomateriaalille korvaamaan nykyisiä jo vanhentuneita materiaaleja. Moni opettaja käyttää itse tekemäänsä opintomateriaalia ja toivookin niihin parannusta. Monessa materiaalissa käytettävä kuvamateriaali on 2D-muodossa, joka onkin tarpeen piirrosmerkkejä ja piirikaavioita opeteltaessa. Komponenttien ja toimilaitteiden rakenne tulee kuitenkin paremmin esiin 3D-kuvien ja animaatioiden myötä.

Haastatteluissa todettiin verkkopohjaisen materiaalin sopivan hyvin opetukseen ja jo olemassa olevan ProDiags-kurssin sopivaksi pohjaksi mahdolliselle pneumatiikan kurssille. Tosin materiaaliin toivottiin enemmän tekstiä ja animaatioita.

## 5 YHTEENVETO

Pneumatiikan järjestelmiä ja teoriaa erilaisten sovelluksien taustalla tarkasteltaessa on tärkeää ymmärtää eri suureiden ja ilmiöiden vaikutukset yksittäisten komponenttien sekä koko järjestelmäkokonaisuuden toimintaan. Parhaiten eri ilmiöt, komponentit ja laskutoimitukset tulevat sisäistetyksi ammattimaisen ja laadukkaan opetuksen myötä. Opettajien asenne opetettavaan aiheeseen on tärkeää, koska se heijastuu opetukseen ja opiskelijoihin joko myönteisenä tai kielteisenä kuvana pneumatiikasta. Myös opettajien tietämys ja opintomateriaalin on tärkeää pysyä koko ajan kehittyvien komponenttien ja ohjausjärjestelmien mukana.

Tässä työssä tutkittiin juuri näitä asioita, jotka vaikuttavat suoraan opetettavaan asiaan. Työn tarkoituksena oli tutkia nykyistä pneumatiikan opintomateriaalia ja ottaa samalla huomioon opettajien mielipiteet ja toiveet sekä nykyisestä että mahdollisesta uudesta opintomateriaalista. Tutkimuksella kartoitettiin, olisiko uudelle materiaalille tarvetta myytäväksi oppilaitoksille. Nykyisen materiaalin kuvamateriaali ja käytännön harjoitukset osoittautuivat heikoksi ja riittämättömäksi. Alla on taulukoituna yhteenveto haastattelujen vastauksista nykyisen opintomateriaalin osalta. Vastauksista oli nähtävissä kuvamateriaalin tarjoaman havainnollisuuden olevan heikohko ja siinä onkin suuri kehittämiskohde, johon uuden materiaalin tulisi vastata. Opiskelijan arviointi tulisi tapahtua opettajien asioiden oppimisen perusteella ja ProDiags-oppimisympäristössä on siihenkin mahdollisuus.

TAULUKKO 1. Nykyisen materiaalin pääkohdat.

Kuvamateriaali	Ohjelmistot	Kirjallisuus	Verkkomateriaali	Arviointi
2D-kuva	Festo Fluid Sim	Ellman ym. Pneumatiikka	Moodle- oppimisympäristö	Teoriatentti
Piirrosmerkki				Suunnittelu

Monet opettajista suosivat omaa tekemäänsä opintomateriaalia ja usein sähköisessä muodossa. Myös alan kirjallisuuden käyttö on suosittua ja erityisesti yksi kirja nousi usein esille (ks. Luku 3.1). Mahdollinen uusi opintomateriaali tulisi olemaan verkkopohjainen, mikä herättikin suosiota opettajien keskuudessa. Joillakin oppilaitoksilla on jo ennestään kokemusta verkkopohjaisesta materiaalista Moodle-oppimisympäristön kautta, missä eri kurssit ovat helposti saatavilla nettiyhteyden avulla.

Pneumatiikan komponenttien toimintalogiikan ymmärtäminen ja syyt sen toiminnalle ovat erittäin tärkeitä. Jos opiskelija ymmärtää, miksi kyseinen komponentti on paineilmajärjestelmässä, hän todennäköisesti ymmärtää myös paremmin sen toimintaperiaatteen ja pystyy tarvittaessa suunnittelemaan vastaavia tai parempia komponentteja. Syyn ymmärtäminen on helpompaa, jos komponentti on käytännössä mahdollista nähdä ja kokeilla sen kytkentämahdollisuuksia osaksi järjestelmään. Tähän tarkoitukseen kehitetty pneumatiikkajärjestelmän testipenkki olisikin hyvä mahdollisuus kytkentäharjoitusten tekemiseen. Sähköpneumatiikan opettaminen voisi helpottua myös testipenkin avulla, jossa opiskelijat voisivat suorittaa sähköisten komponenttien ja ohjauslogiikan signaalimittauksia. Alla on taulukoitu na yhteenveto haastattelujen vastauksista materiaalin kehittämiskohteiden osalta.

TAULUKKO 2. Materiaalin kehittämisen pääkohdat.

Nykyinen opintomateriaali	Koulutusohjelman sisältö	Harjoitukset ja laboratoriotyöt	Projektit	Arviointi	Uusi opintomateriaali
Alan kirjallisuus	Havainnollisuus	Suunnittelu	Yritysten yhteistyö	Käytännön harjoitus	Interaktiivisuus
Opettajan materiaali	Kuvamateriaali	Testipenkki	Harjoitukset ja projektit	Suunnitteluharjoitus	Enemmän käytäntöä
ProDiags					Havainnollisempia kuvia

Pneumatiikka ja sen komponentit tulevat kehittymään ja muuttumaan tulevaisuudessa. Myös opetusmateriaalin tulee muuttua ja kehittyä. Automatiikan lisääntyminen on jo nyt nähtävissä erilaisissa ratkaisuissa ja se tulee lisääntymään entisestään digitaalisesti ohjattujen venttiililohkojen ja älykkäiden järjestelmien myötä. Tämä on haaste, johon opettajien tulisi vastata kehittämällä itseään ja opintomateriaalia, minkä kehittämisen kartoittamiseen tämä tutkimus tehtiinkin.

Tutkimuksen avulla selvitettiin, että uudistetulle opintomateriaalille on tarvetta varsinkin havainnollisuuden osalta. Havainnollisuus tarkoittaa 3D-kuvien ja interaktiivisten ominaisuuksien lisääntymistä opintomateriaalissa. Tarve todettiin myös testipenkille, jossa voi suorittaa esimerkiksi käytännön järjestelmien kytkentä- ja huoltoharjoituksia.

## LÄHTEET

- Keinänen, T. & Kärkkäinen, P. 2005. Automaatiojärjestelmien hydrauliiikka ja pneumatiikka. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.
- Douglas, J., Gasiorek, J., Swaffield, J. & Lynne, J. 2005. Fluid Mechanics. Fifth Edition. Essex: Pearson Education Limited.
- Bell, C. 1997. Maximum Boost. Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems. Cambridge: Bentley Publishers.
- Kärkkäinen, P & Keinänen, T. 2000. Hydrauliiikka ja pneumatiikka. Koneautomaatio 1. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.
- Salminen, L. & Suhonen, R. 2008. Oppiminen ja oppimismenetelmät ja niiden hyödyntäminen ammatillisen kehittymisen tukena – raportti täydennyskoulutuksesta ja sen mahdollisuuksista. [Verkkojulkaisu]. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu. Turun yliopisto. Hoitotieteen laitos. [Viitattu 12.12.2010]. Saatavana: [http://portal.hamk.fi/portal/page/portal/HAMKJulkisetDokumentit/Yleisopalvelut/Julkaisupalvelut/Kirjat/kielet\\_kulttuuri\\_hyvinvointi/OppiminenJaOppimismenetelmatJaNiiden.pdf](http://portal.hamk.fi/portal/page/portal/HAMKJulkisetDokumentit/Yleisopalvelut/Julkaisupalvelut/Kirjat/kielet_kulttuuri_hyvinvointi/OppiminenJaOppimismenetelmatJaNiiden.pdf)
- M-Tec. 2009. Mugen-Power. [Verkkosivu]. Japani: M-Tec Co., Ltd. [Viitattu 13.12.2010]. Saatavana: <http://www.mugen-power.com/automobile/products/CIVICTYPE-R/parts/index.html>
- MTI. 2009. Air Energy. [Verkkosivu]. Australia: MTI Business Services. [Viitattu 8.1.2011]. Saatavana: <http://www.airenergy.com.au/systems.html#schematic>
- Mediakolmio. Tehohydro Oy. [Verkkosivu]. Suomi: Mediakolmio Oy. [Viitattu 8.1.2011]. Saatavana: <http://www.tehohydro.fi/index.php>
- Ellman, A., Hautanen, J., Järvinen, K. & Simpura, A. 2002. Pneumatiikka. Edita Publishing Oy.
- Uicker, J., Pennock, G. & Shigley, J. 2003. Theory of Machines and Mechanisms. Third Edition. New York: Oxford University Press.
- Hulkkonen, V. 2008. Fluid klinikka No 18. Fluid Finland 1-2008.

## **LIITTEET**

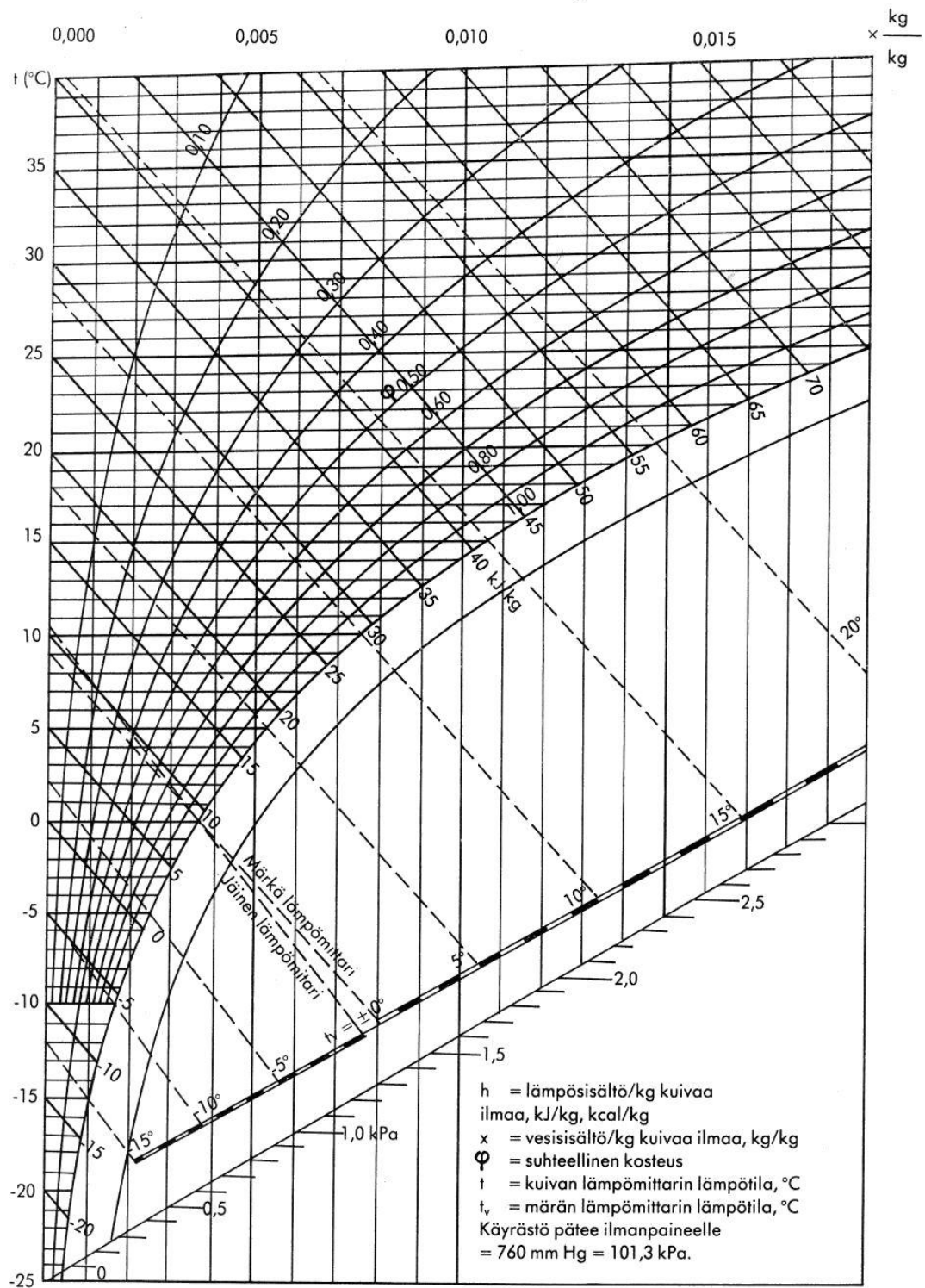
**Liite 1. Mollier-käyrästö**

**Liite 2. Moodyn diagrammi**

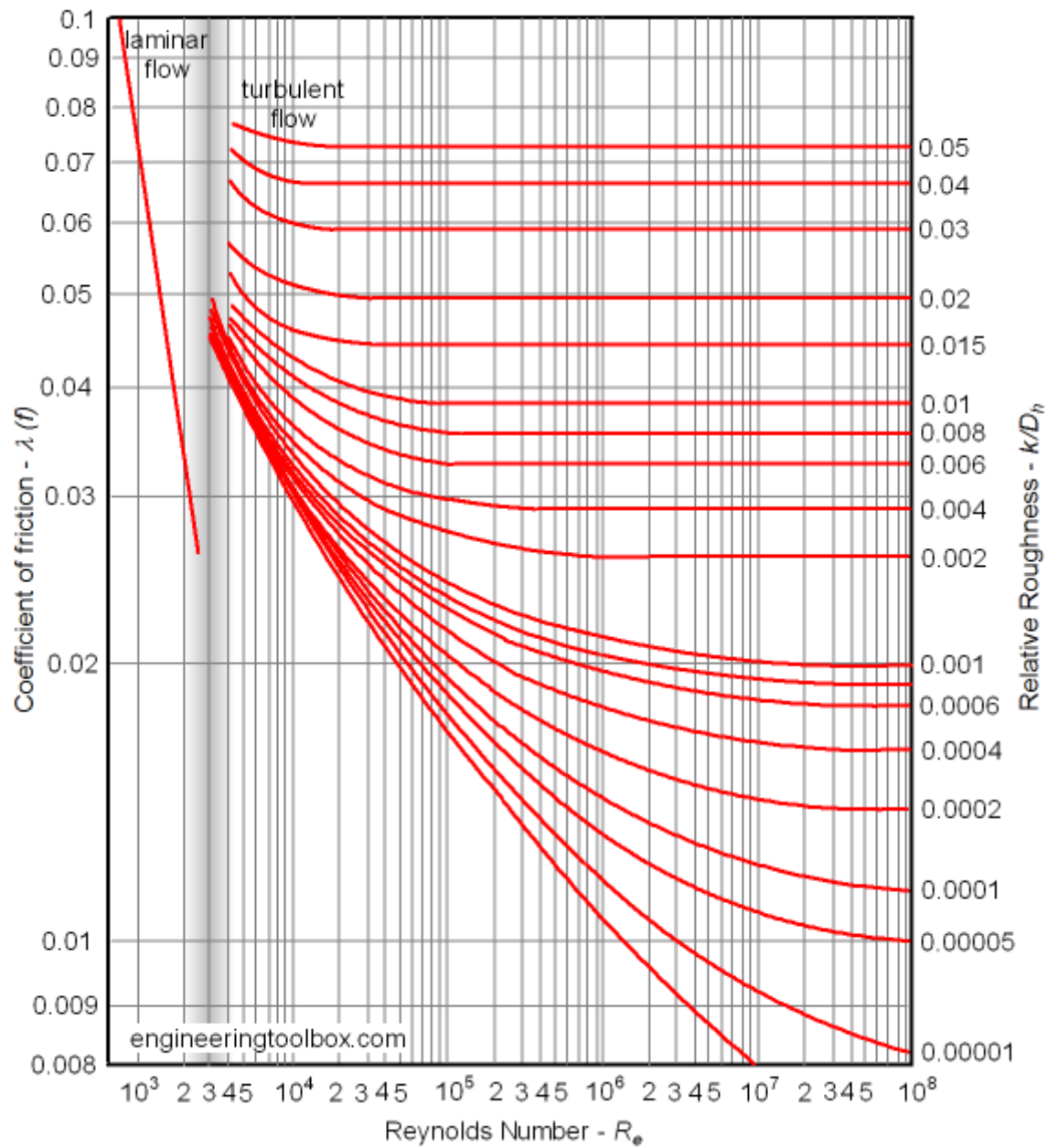
**Liite 3. Putkinomogrammi**

## Liite 1. Mollier-käyrästö

### Kostean ilman Mollier-käyrästä



## Liite 2. Moodyn diagrammi





### Liite 3. Putkinomogrammi

